干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

doi:10.12118/j.issn.1000-6060.2019.03.14

额河源流采金矿区不同恢复措施对矿区物种多样性和地上生物量的影响①

许 佳[1]， 祝晓曈[2,3]， 苑塏烨[2,3]

（1 新疆额尔齐斯河流域开发工程建设管理局，新疆 乌鲁木齐 830002； 2 中国科学院大学，北京 100049；
3 中国科学院新疆生态与地理研究所，新疆 乌鲁木齐 830011）

摘 要：以额河源流采金后废弃矿区为研究对象，于2011—2015年期间，通过采取不同恢复措施从被破坏矿区草地植物多样性和生物量的角度分析植被恢复效果。结果表明：(1)不同恢复措施促使各植物群落的物种数增加了5%～30%，说明采取恢复措施使得矿区生态环境得到了一定程度的恢复。(2)综合植被群落结构、盖度和地上生物量、物种多样性指数分析，措施A5(推平+圈羊)、A4(推平+补水)、A3(推平+覆土+黑加仑)较其他措施恢复效果更为显著。(3)通过对各样地植被丰富度指数(R)、Shannon-Wiener指数(H')、Simpson指数(D)、Pielou(Jsw)指数与地上生物量分别进行回归分析，发现指数曲线拟合关系最好。表明物种多样性与地上生物量均存在较显著的正相关关系($P<0.05$)。本研究可为类似矿区的植被恢复与重建提供参考和借鉴。

关 键 词： 额河源流；人工措施；矿区；物种多样性；生物量
文章编号： 1000-6060(2019)03-0581-09(0581～0589)

矿业作为我国重要的基础能源产业之一，在我国经济的发展、国防建设中起着重要的作用[1]，同时采矿活动也产生了诸如水土流失、大气污染、土地破坏等一系列问题[2-6]。自20世纪70年代开始，我国的矿区恢复工作开始展开，针对于不同的矿区类别，在理论体系构建和技术应用研究方面都取得了重要的突破[7-9]。

额河源流砂金矿的开采造成了大规模的土地破坏，特别是土壤和植被，而当地的放牧强度并未随生态环境破坏有所减少。作为矿区复垦恢复的主要步骤之一，植被生态系统的重建能够使得矿区植被生态恢复周期大大缩短，同时通过采取不同的重建模式使得矿区植被群落在恢复过程中形成不同的功能性状，提高存活率[10-12]。

物种多样性和生产力与环境因子之间的相互作用机理一直是生态学领域研究的热点[13-15]。物种多样性作为量物种数目及其相对多度的指标，常被用于研究群落的结构与功能[16]。土壤是植物生长必备的重要条件[17]，且结构决定功能，植被生产力(地上生物量)是其功能的重要体现者。通过对比分析不同矿区生态恢复措施下植物物种多样性变化对于完善矿区生态复垦理论基础，开展相关矿区生态恢复重建工作具有重要的科学意义与实践价值。目前，有学者对阿勒泰两河源植被多样性做过相关研究[18]，但对不同恢复措施下的额河源流砂金矿区草原植被恢复与重建的研究却很少。因此，本文基于植被群落调查和实验分析，定量的分析了额河源流砂金矿区复垦地恢复过程以及不同恢复措施对草地的结构、功能和物种多样性的影响，寻求最适宜的重建模式，进而为矿区受损草地的治理、恢复以及草地生产力的提高和持续利用提供科学依据。

1 研究区概况

额尔齐斯河源位于新疆富蕴县阿尔泰山南坡，沿阿尔泰山南麓流向西北，最终汇入北冰洋。流域全长4 248 km，面积164×10^4 km^2[19]。涉及采金的废弃矿区位于1 500～2 100 m的真草原，土壤类型

① 收稿日期：2018-10-15； 修订日期：2019-02-21
基金项目：新疆维吾尔自治区科技支撑项目(201533110)；国家自然科学基金项目(41471099)
作者简介：许佳(1984-)，男，高级工程师，本科，主要从事水利信息化和水生态研究与实践．E-mail:xj8476@qq.com

主要为灰色森林土,建群种是真旱生、广旱生的多年生植物,其中以丛生禾草为主,并有少量中生、旱生植物,这里气温较低,年平均温度在 -2 ℃左右,年降水量在 300 ~ 500 mm。区内动植物物种丰富,景色秀丽,但近 30 a 对矿产资源掠夺式的开采,造成了极其严重的生态退化问题。主要表现在沿古河床,地形起伏从平缓的坡地增大到垂直落差近 30 m,表层土壤剥离、深层土壤因冲洗而几乎全部流失、地表植被毁灭性的破坏,成为乱石堆。因此,国家于 2006 年起开始实施矿区恢复,本试验的研究工作于 2010 年开始。

2 实验材料与方法

2.1 实验设计

不同恢复措施的样地均设在额河源流砂金矿区的受损草地上(图 1)。试验于 2011 年 10 月初进行样地布置,试验共 8 个样地,每个试验样地大小为 400 m × 200 m,每个样地距离间隔大于 1 km。由于被破坏矿区地表多为大小不一的石砾,不利于水土保持和植物生长。首先进行地表平整,主要利用机械整平的方式,通过推土机将地形起伏不大的地区推平,坡度较高以及深沟地区采用装卸设施进行平整。样地布置完毕后其周边添加围栏,以免动物的践踏和啃食。

通过前人研究,对废弃矿区进行植被恢复有多种方法[20-21],本研究主要将其中 5 种方法考虑在内:

(A)人工覆土,在矿区实验地附近取土并均匀的覆盖在平整后的实验样地地表,覆土厚度约为 2 ~ 3 cm。

(B)在 5 月或 9 月中旬,选用 2 ~ 3 年扦插苗在平整后的地表采用穴栽的方式种植黑加仑,并将营养土覆盖在黑加仑根部直至完全覆盖。

(C)补水处理,将春季洪水引至实验区,主要有洪水漫溢和靠近河道实验地的河水补给两种形式。

(D)羊群驻扎,为提高样地土壤养分条件、优化植被生长环境,对样地进行增加羊粪处理。在经过平整后的某实验区域内让羊群在结草籽时段停留在实验区域,一方面羊粪当中含有大量的成熟草籽,另一方面羊身体表面也附着数量可观的草籽。

(E)喷泥浆,将水和土按体积比 9:1 混合后,利用水泵抽出后均匀喷洒在实验区。

(F)撒羊粪,直接将羊粪按 0.5 cm、1 cm、1.5 cm、2.0 cm 厚度覆盖在推平后的试验地,一年后观测恢复效果。

由于不采取人工恢复措施,依靠自然生态系统几乎无法短时间内恢复植被,两河源自然生态保护区通过以上措施,开展植被恢复实验。实验共布置了 8 个处理 56 个样方(表 1)、对照没有采取任何措施的废弃矿区(3 个样方)、原始草地(3 个样方),共布置 62 个样方。

2.2 研究方法

(1)植被调查在每个实验样地内随机选取 5 个大小为 1 m × 1 m 的样方进行植被群落种类结构调查,并将样方内的物种种类(N)、每种植被的个数(n)、高度(h)及其盖度记录。

(2)生物量测定

地上生物量的测定采用收获法,将样方内的全

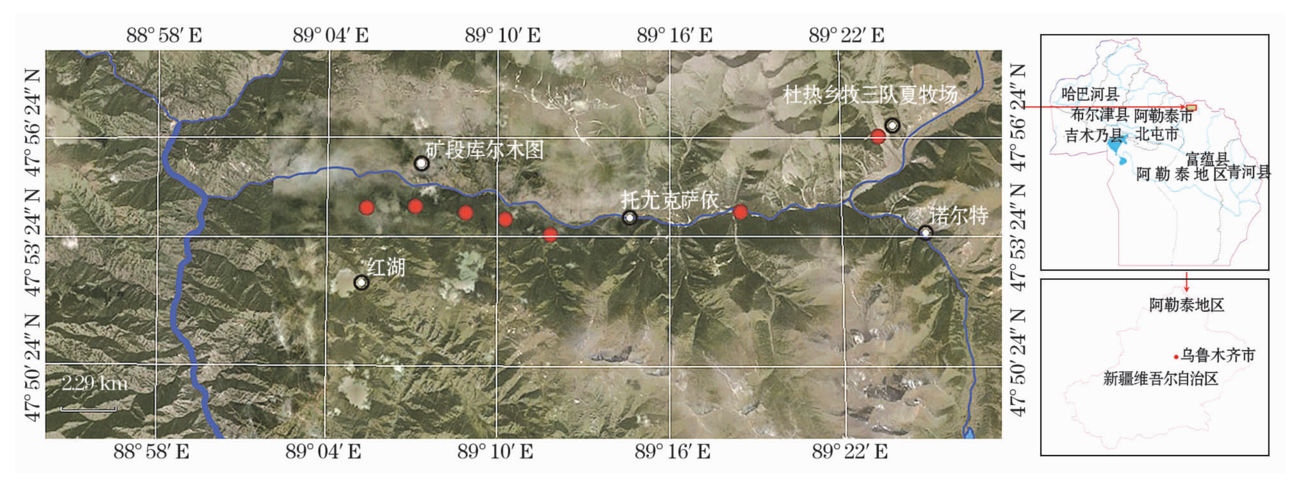


图 1 实验样地位置

Fig. 1 Location of experimentation area

表 1　实验地恢复措施

Tab. 1　Recovery measures of the study fields

措施编号	处理措施	恢复年限/a	地理坐标
A1	地表平整	4 a	47°53′49.8″N,89°17′8.8″E
A2	地表平整+种植黑加仑	4 a	47°53′54.4″N,89°13′29.1″E
A3	地表平整+覆土+种植黑加仑	4 a	47°55′48.8″N,89°23′30.2″E
A4	地表平整+羊群驻扎	4 a	47°53′52.8″N,89°12′3.6″E
A5	地表平整+人工补水	4 a	47°54′47.5″N,89°12′7.6″E
A6	地表平整+喷泥浆	4 a	47°54′45.3″N,89°13′10.2″E
A7	地表平整+撒羊粪	4 a	47°54′55.6″N,89°20′5.6″E
A8	地表平整+撒羊粪+喷泥浆	4 a	47°54′46.3″N,89°21′4.5″E

部植物齐地面刈割,除去粘附的土壤、砾石等杂质装入密封塑料袋中,在 65 ℃恒温箱内烘干至恒重。

(3)土石比测定

由于采矿活动造成地面扰动,使得矿区水土流失严重,因此,在选取土石比指标,在实验样地内,随机取大小为 40 cm×40 cm,厚度约为 20 cm 的土层,将石块和土壤挖出,人工除去植物的根茎及其他杂物,获得土块样本,带回实验室,利用木棍将样本碾碎,将碾碎后的土壤样本过 5 mm 筛目,并用记号笔将能过筛的土样标为 M_1,不能过筛的土样标为 M_2,将二者分别在电子天平上称重,电子天平的精度为 0.5 g,记录二者的称重值,利用公式(4)计算土样的土石比 W(%)

$$W_{土石比} = M_1 / M_2 \times 100\% \qquad (1)$$

(4)物种多样性和相似性计算

利用样地植被调查数据,分别计算物种丰富度(R)指数、Shannon-Wiener 指数(H')、Pielou 指数(Jsw)、群落相似性指数(C)以及 Simpson 指数(D),研究实验样地的植物群落物种多样性和相似性特征。具体的计算公式如下:

$$R = \frac{(S-1)}{\ln N} \qquad (2)$$

$$H' = -\sum P_1 \ln P_i \qquad (3)$$

$$Jsw = \frac{H'}{\ln S} \qquad (4)$$

$$D = 1 - \sum P_i^2 \qquad (5)$$

$$C = \frac{2j}{a+b} \qquad (6)$$

式中:S 为植被调查中样方内出现的物种数;$P_i = N_i/N$(N 代表群落中所有种的重要值之和;N_i 代表第 i 个种的重要值),重要值 =(相对盖度 + 相对频度 + 相对高度)× 100/3)[22]。C 为相似系数;j 为两样地共有的物种;a 和 b 分别为废弃矿区与原始草地的物种数。

2.3　数据处理与分析

利用 Excel 和 SPSS10.0 对实验数据进行统计分析和绘图,其中检验差异显著性利用 Ducan 多重比较的方法,利用标准误(Standard Error)表示方差。

3　结果与分析

通过对比分析受损矿区恢复前后的植物群落多样性的变化对于恢复和重建当地植被群落生态系统具有重要的指导性[23],为研究恢复措施前后植物群落结构和功能的变化,本文选取群落多样性指标表征植被群落的构成,基于野外植被样地调查以及内业实验处理与分析,以数量生态学的理论为基础,定量的分析了额河源流废弃矿区恢复过程,及不同恢复措施对草地的结构、功能和物种多样性的影响,寻求最适宜的恢复措施,进而为矿区受损草地的治理、恢复以及草地生产力的提高和持续利用提供科学依据。

3.1　采取恢复措施后样地群落物种组成

群落的优势种和种类组成可以反映出草原植物群落的外貌特征,因此,优势种的变化成为群落变化的标志。结果显示(表 2),调查样方内的植物共有 18 科 38 属 40 种,其中大多数为耐旱多年生或 1 a、2 a 生草本植物,根系较浅,同时样地有较少的灌木、半灌木;从群落构成分析,样地群落主要以菊科(Compositae)、禾本科(Gramineae)为主,占植物总数的 65.93%,其次蔷薇科(Rosaceae)、豆科(Leguminosae),这说明样方内植物群落科属组成较为分散。

如表 2 所示,废弃矿区样地内没有任何植物,采取恢复措施的样方中优势种群明显,少数物种在群落生态功能的维持上起着重要作用,同时,采取恢复措施后,群落结构的变化很小,这也说明短期封禁虽能快速恢复植被,但促使群落结构向结构更复杂的顶极群落过渡还需要一个较长的时间。

措施覆土+种植黑加仑和喷泥浆样方内的草本群落恢复明显,禾本科植物和多年生草本开始入侵,

禾本科植物是优质牧草，其数量在样地的增加说明了在该恢复措施下，样地的植物群落结构有所改善，瑞士羊茅（*Festuca valesiaca*）成为人工措施干扰后的优势种；一些不耐贫瘠的植物在群落中的竞争力有所增加，如喀什蒿（*Artemisia kaschgaria* Krascn.）、羽衣草（*Alchemilla japonica*）、勿忘我（*Myosotis silvatica* E.）、蓼科（Polygonaceae）等植物。相反，一些耐贫瘠的植物在群落中的竞争力有所下降或消失，如西伯利亚羽衣草（*Alchemilla*）、短柄芝麻（*Lamium album*）、野火球（*Trifolium lupinaster* Linn.）等。

表 2　不同恢复措施草地群落物种组成和重要值

Tab. 2　Species composition and important values of grassland communities in different restoration measures

植物名	重要值									
	原始草地	废弃矿区	地表平整	覆土+种植黑加仑	羊群驻扎	覆羊粪	种植黑加仑	河水漫溢	喷泥浆	覆羊粪+喷泥浆
瑞士羊茅 *Festuca valesiaca*	48.3			76.9	48.54		87.9	77.1	137.3	65.7
大看娘麦 *Alopecurus pratensis*	64.9			60.5			134.1	40.4		
金丝桃叶绣线菊 *Spiraea hypericifolia* Linn.	11.3			30.6		34.3	40.9		13.5	32.9
蒲公英 *Taraxacum mongolicum* Hand.	26.7		18.7	28.7	35.95	12.5	21.8		25.5	25.1
高山蓼 *Polygonum alpinum* All.	51.6			48.5	39.28				60.5	
两栖蓼 *Polygonum amphibium* Linn.	39.4			43.8			12.6			
发草 *Deschampsia caespitosa* (Linn.) Beauv.	47.9		100.0	53.8	74.29	55.2	101.2	26.4	76.8	14.1
多伞阿魏 *Ferula ferulaeoides* (Steud.) Korov.	48.5									
野火球 *Trifolium lupinaster* Linn.	28.7			27.5				32.9		
早熟禾 *Poa annua* Linn.	62.8		50.5	73.6	31.28	47.4	18.5	100.3	73.4	68
黄花苜蓿 *Medicago falcate* L.	15.6			9.9	38.07	20.2	45.6		41.3	25.9
森林勿忘我 *Myosotis sylvatica*	19.1			35.5						44.1
单叶毛茛 *Ranunculus monophyllus* Ovcz.										40.9
地蔷薇 *Chamaerhodos erecta* (Linn.) Bge.										
阿勒泰狗娃花 *Heteropappus altaicus* (Willd) Novopokr									4.8	
无心草 *Gnaphalium affine*				12.3						
猪毛菜 *Salsola collina* Pall.									24.0	40.3
喀什蒿 *Artemisia kaschgaria* K.				31.1	39.56	85.4	12.6		19.5	
丝状点地梅 *Androsace filiformis*			98.7	27.8			106.2			
苦苣菜 *Sonchus oleraceus* Linn.					35.09				19.4	51.7
小蓬草 *Conyza canadensis* (Linn.) Cronq.				35.9					27.7	
大车前 *Plantago major* Linn.				20.7					23.7	25.4
荠菜 *Capsella bursa-pastoris* (L.) Medic.			77.9		45.60		26.4	18.1	68.4	
野豌豆 *Vicia sepium* Linn.				18.3						
西伯利亚羽衣草 *Alchemilla sibirica*				13.6	33.08					
蒙新风毛菊 *Saussurea grubovii*				53.4						
异燕麦 *Helictorichon schellianum*				65.4	58.41		85.7	64.6		
灰灰菜 *Chenopodium album*						45.6		40.1	37.9	62.5
芹叶荠 *Smelowskia calycina*				18.3			41.4			
短柄芝麻 *Lamium album*				55.3						
二裂委陵菜 *Potentilla bifurca* Linn.				24.5				13.8	21.6	48.7
野菠菜 *Rumex acetosa*				80.2		23.9			56.5	45.3
球花藜 *Chenopodium foliosum* (Moench) Aschers.						23.4			32.1	47.4
节节草 *Equisetum ramosissimum* Desf.				19.4			9.7	17.3	19.1	23.5
山地糙苏 *Phlomis oreophila* Kar. et Kir.				26.7				9.7		
大花葱 *Allium giganteum*				27.9						
齿叶沙参 *Adenophora stricta*				35.2						
萹蓄 *Polygonum aviculare* Linn.						40.7			34.4	42.2
藓类 Mosses				17.9				9.0		
凤毛蕨 *Coniogramme intermedia*				21.9	35.1					
物种总数	12	0	5	30	12	10	14	12	20	17

3.3　不同恢复措施对群落多样性的影响

物种多样性作为衡量地区生物资源丰富程度以及物种分布的均匀性的重要指标,对于反映当地生态系统以及群落的结构复杂性具有重要的意义[24]。

如图2所示,废弃矿区样地内不存在植被,采取恢复措施后,样方内的物种多样性情况显著改善,但不同恢复措施样地间物种多样性也存在差异。

丰富度指数(R)反应了样地植物物种的丰富程度。措施推平+覆土+黑加仑样地内的丰富度指数最大为1.52±0.13;其次是措施推平+喷泥浆。

优势度Simpson(D)指数是用来表征群落或生境遭破坏后的修复能力和对抗干扰能力的强弱[6]。在本研究中,河水漫溢样地内的Simpson指数最高,其次是措施羊群驻扎。

均匀性指数作为表征植物在空间分布上的均匀程度重要指标,其数值越大反映植被在空间上分布越为均匀,反之则表示植物在空间上越为集中[7]。措施河水漫溢和羊群驻扎对草地植被恢复起到了积极的作用。

香浓—威纳指数在均匀度指数和丰富度指数的影响下,借用于信息论的方法能够反映植物的个体分配是否均匀,群落复杂程度是否增加[25]。在本研究中,措施河水漫溢在维护区域植物物种多样性、区域生态平衡等方面起到重要作用;其次,措施羊群驻扎对植被恢复的效果也较好。

3.4　不同恢复措施对盖度和生物量的影响

植被盖度作为衡量植物茂盛程度和植物进行光合作用面积大小的重要指标,也常被选作表征植物群落结构稳定性的重要指标。同时,植物的生物量是体现植物生产力及群落功能的重要参照[26]。

从图3可以看出,措施覆土+种植黑加仑样方内的植被盖度恢复效果最显著,达到53.2%,经方差检验,显著高于其他样地($P<0.05$);其次是措施河水漫溢样方内的植被盖度较高。

措施覆土+种植黑加仑样方内的地上生物量最高,达到463.1 g·m^{-2},经方差检验,与其他样地存在显著差异($P<0.05$);其次是措施河水漫溢样方内的地上生物量恢复效果较好。

各措施样方内的植被盖度和地上生物量恢复效果基本一致,经回归分析表明,二者具有极显著的线

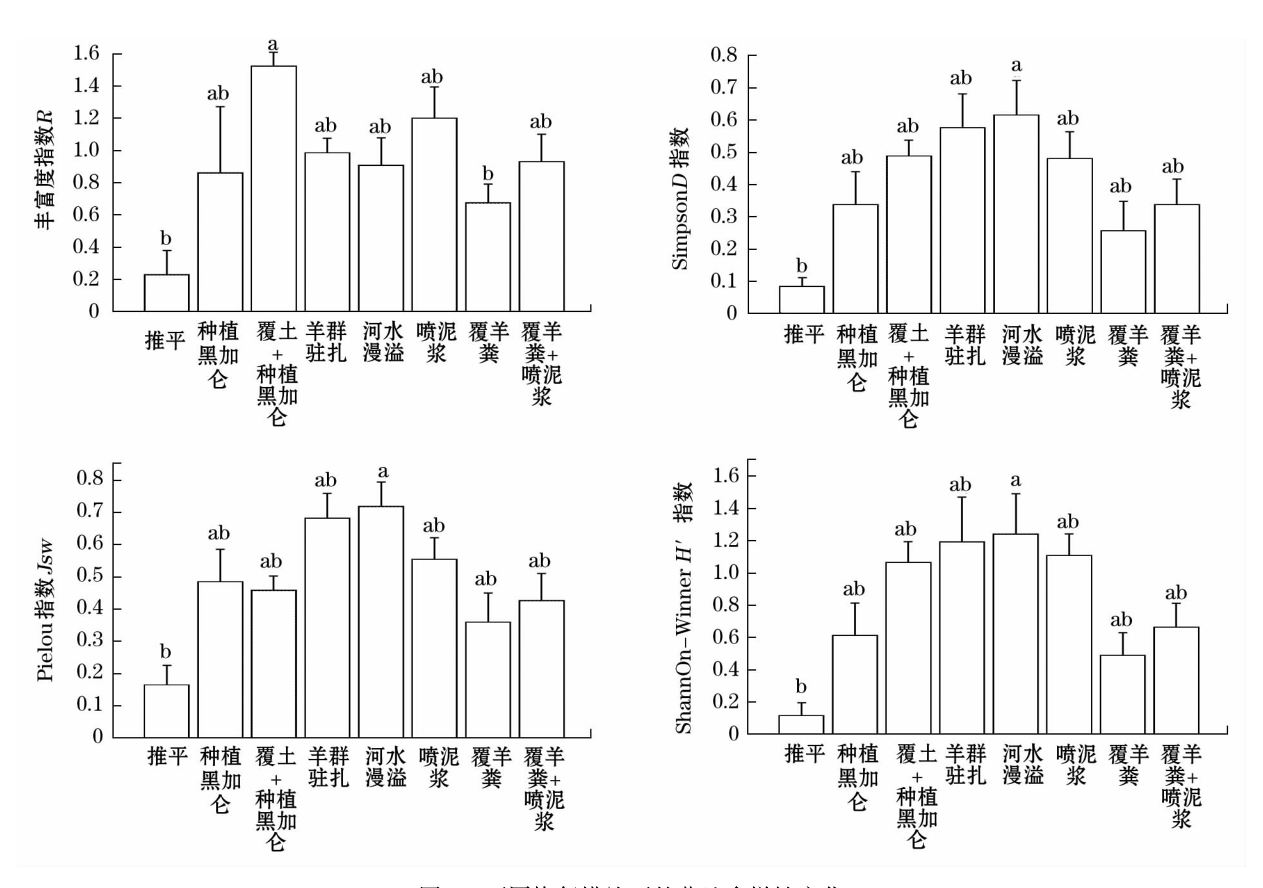


图2　不同恢复措施下的草地多样性变化

Fig. 2　Change of grassland diversity under different restoration measures

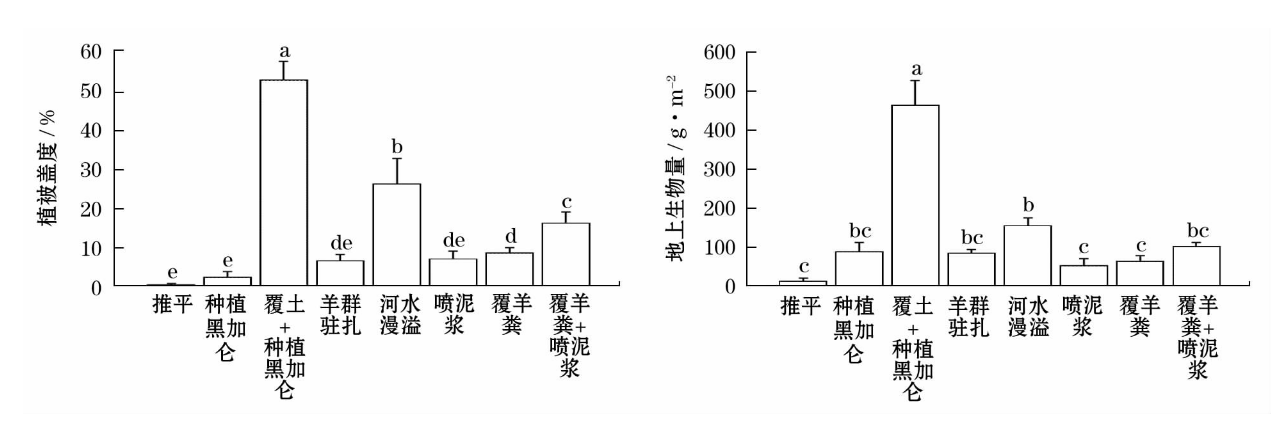


图3 不同恢复措施草地群落的外貌特征

Fig. 3 Physiognomy of grassland communities with different restoration measures

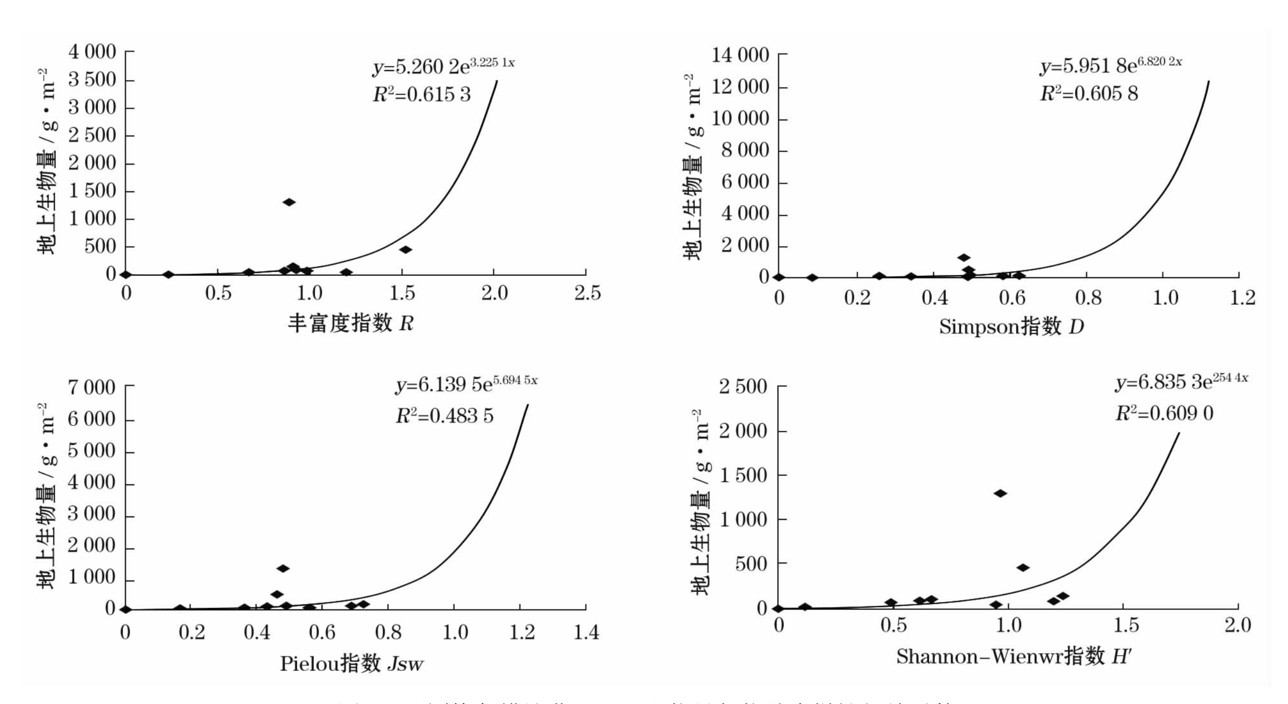


图4 不同恢复措施草地地上生物量与物种多样性相关系数

Fig. 4 Correlation coefficient of biomass and species diversity in different restoration measures

性相关关系，满足公式 $y = 12.91x - 38.465$（$R^2 = 0.9402$）。

3.5 不同恢复措施生物量与物种多样性的关系

通过对各样地植被丰富度指数（R）、Shannon－Wiener 指数（H'）、Simpson 指数（D）、Pielou（Jsw）与植物的生物量分别回归分析发现，二者的呈指数变化，且拟合关系较好（图4）。表明物种多样性与地上生物量均存在较显著的正相关关系（$P<0.05$）。从回归结果来看，回归系数均达极显著，标准误很小，从散点图来看，横轴在0～1.5之间、纵轴在0～1 400之间分布了各自的点，样点分布较为均匀，误差点极少，研究结果表明物种多样性指数与植物地上生物量呈现正相关关系，及随着物种多样性的增加，样方的植物生产力也有所提高。

4 讨论

植物物种多样性与生态系功能的关系及其作用机理一直是生态学研究的热点，作为生态系统功能的重要体现，生态系统的生产力水平与物种多样性之间的关系也随着研究区域的差异而表现为不同的形式，包括正相关、负相关、“单驼峰型”曲线以及无显著相关[27－30]。研究发现，通过对矿区进行生态恢复，植物群落的物种多样性与生物量显著提高，且物种多样性与生产力的总体关系呈对数线性增加关系。这一研究结果与雷声坤等在榆林沙地矿区植被

恢复研究以及覃光莲等在高寒草甸植物群落中物种多样性与生产力关系研究结果一致[31－32]。由于当地环境条件对草地的生产力以及物种多样性也具有一定的影响,随着不同恢复措施下空间(生境)的改变,多样性与生产力的关系会发生变化[33]。此外,根据贾翔等人的研究,额河源流植被的生长周期较短,故时间因素对于植物物种多样性与生产力之间的关系也有影响[34]。因此,在后续的研究二者的关系时,应该加入时间及空间因素,考虑其对植物物种多样性与生产力的影响。

5　结 论

(1)采取措施植被恢复后,样方内的植物种类得到了一定程度的恢复。措施覆土＋种植黑加仑和喷泥浆样方内的草本群落恢复明显。

(2)各恢复措施样方内的物种多样性存在较大差异,措施河水漫溢在维护区域植物物种多样性、区域生态平衡等方面起到重要作用;其次,措施羊群驻扎对植被恢复的效果也较好。

(3)通过拟合样方内的物种多样性和地上生物量关系,发现两者之间存在较为显著的正相关关系($P<0.05$)。同时,从恢复植被盖度和地上生物量的角度,建议采取覆土＋种植黑加仑措施。

参考文献(References)

[1] XIA Cao. Regulating mine and reclamation in developing countries the case of China[J]. Land Use Policy,2006,24(7):472－476.

[2] 徐嵩龄. 采矿当地生态重建和恢复生态学[J]. 科技导报,1994,20(3):49－51.[XU Songling. Ecological reconstruction at mines and restoration ecology[J]. Science and Technology Review,1994,20(3):49－51.]

[3] 杨修,高林,吴刚. 矿区废弃地复垦的理论与技术[M]. 北京:中国环境科学出版社,1999:124－136.[YANG Xiu,GAO Lin,WU Gang. The theory and technology of depleted mined land[M]. Beijing: China Environmental Science Press,1999:124－136.]

[4] 周树理. 矿区废弃地复垦与绿化[M]. 北京:中国林业出版社,1995:131－148.[ZHOU Shuli. The afforest of depleted mined land[M]. Beijing:China Forestry Publishing House,1995:131－148.]

[5] LI M S. Ecological restoration of mine land with particular reference to the metalliferous mine wasteland in China:A review of research and practice[J]. Science of the Total Environment,2006,35(7):38－53.

[6] 杨修,高林. 德兴铜矿矿区废弃地植被恢复与建研究[J]. 生态学报,2001,21(11):1932－1940.[YANG Xiu,GAO Lin. A study on re-vegetation in mining wasteland of Dexing Copper Mine[J]. Acta Ecologica Sinica,2001,21(11):1932－1940.]

[7] 王英辉,陈学军. 金属矿区废弃地生态恢复技术[J]. 金属矿山,2007,(6):4－7.[WANG Yinghui,CHENG Xuejun. Ecological restoration technology for abandoned land in metal mining area[J]. Metal Mine,2007,(6):4－7.]

[8] 毕德,吴兴华,骆永明,等. 浙江典型铅锌矿废弃地优势植物调查及其重金属含量研究[J]. 土壤,2006,38(5):591－597.[BI De,WU Xinghua,LUO Yongming,et al. Ecological restoration technology for metal mine wasteland[J]. Soil,2006,38(5):591－597.]

[9] 辜彬,王丽. 露天开采矿区生态恢复的基本理论与方法[J]. 中国水土保持科学,2006,4(12):134－137.[GU Bin,WANG Li. On the theory and techniques of eco-environmental harness of opencast mine[J]. Science of Soil and Water Conservation,2006,4(12):134－137.]

[10] 胡胜华,刘超,曾克峰. 庐山山南地区瓷土矿尾沙山植被恢复途径初步研究[J]. 中国水土保持,2004,(6):11－14.[HU Shenghua,LIU Chao,ZENG Kefeng. Preliminary study on vegetation restoration ways of Taisha Mountain in porcelain soils in the southern area of Lushan Mountain[J]. Soil and Water Conservation in China,2004,(6):11－14.]

[11] 郭逍宇,张金屯,宫辉力,等. 安太堡矿区复垦地植被恢复过程多样性变化[J]. 生态学报,2005,25(4):107－114.[GUO Xiaoyu,ZHANG Jintun,GONG Huili,et al. Analysis of changes of the species diversity in the process of vegetation restoration in Antaibao Mining Field,China[J]. Acta Ecologica Sinica,2005,25(4):107－114.]

[12] 王翔,李晋川,岳建英,等. 安太堡露天矿复垦地不同人工植被恢复下的土壤酶活性和肥力比较[J]. 环境科学,2013,34(9):3601－3606.[WANG Xiang,LI Jincuan,YUE Jianying,et al. Comparison of soil fertility among open-pit mine reclaimed lands in Antaibao regenerated with different vegetation types[J]. Enviromental Science 2013,34(9):3601－3606.]

[13] 白永飞,李凌浩,王其兵. 锡林河流域草原群落植物多样性和初级生产力沿水热梯度变化的样带研究[J]. 植物生态学报,2000,24(6):667－673.[BAI Yongfei,LI Linghao,WANG Qibing. Changes in plant species diversity and product along gradients of precipitation and elevation in the Xilin River Basin Inner Mongolia[J]. Chinese Journal of Plant Ecology,2000,24(6):667－673.]

[14] SCHAFFERS A P. Soil,biomass,and management of semi-natural vegetation-Part II. Factors controlling species diversity[J]. Plant Ecology,2002,158(2):247－268.

[15] KAHMEN A,PERNER J,AUDORFF V,et al. Effects of plant diversity,community composition and environmental parameters on productivity in montane European grasslands[J]. Oecologia,2005,142(4):606－615.

[16] 马克平,黄建辉. 北京东灵山地区植物群落多样性研究——丰富度、均匀度和物种多样性指数[J]. 生态学报,1995,15(3):268－277.[MA Keping,HUANG Jianhui. Plant community diversity in dongling mountain Beijing China:Species richness evenness and species diversities[J]. Acta Ecologica Sinica,1995,15(3):268－277]

[17] 王强,吴炳方,朱亮. 土壤厚度研究进展[J]. 安徽农业科学,2012,(9):5273 - 5287. [WANG Qiang,WU Bingfang,ZHU Liang. The research of thickness of soil[J]. Anhui Agricultural Science,2012,(9):5273 - 5287.]

[18] 王山,努尔巴衣·阿不都沙勒克. 阿尔泰两河源物种多样性及其保护[J]. 甘肃联合大学学报(自然科学版),2006,(5):83 - 86. [WANG Shan,ABUDULEIKE Nuerbayi. The protection of species diversity of the two river area in Altay Mountains[J]. Journal of Gansu Lianhe University (Natural Sciences),2006,(5):83 - 86.]

[19] 李佳秀,陈亚宁,刘志辉,等. 额尔齐斯河流域 MOD 系统变化及其对气候与人类活动的响应[J]. 水土保持研究,2018,25(2):250 - 2580 [LI Jiaxiu,CHEN Yaning,LIU Zhihui,et al. Variation of mountian-oasis-desert(MOD) system and its response to climate change and human activities in Irtysh river basin[J]. Research of Soil and Water Conservation,2018,25(2):250 - 2580.]

[20] 宋祥兰,郭小宁,邝先松,等. 矿区生态退化与生态恢复研究进展[J]. 南方林业科学,2015,43(3):2 - 5. [SONG Xianglan,Guo Xiaoning,KUANG Xiansong,et al. Research progress on ecological degradation and ecological restoration in mining areas[J]. Southern Forestry Science,2015,43(3):2 - 5]

[21] 陶忠明,田振环,李华,等. 霍林河矿区的生态修复与建设[J]. 内蒙古林业调查设计,2010,33(2):2 - 3. [TAO Zongming,TIAN Zhenhuan,LI Hua,et al. Ecological restoration and construction of Huolinhe Mining Area[J]. Inner Mongolia Forestry Investigation and Design,2010,33(2):2 - 3.]

[22] 呼格吉勒图,杨劼,宝音陶格涛,等. 不同干扰对典型草原群落物种多样性和生物量的影响[J]. 草业学报,2009,18(3):6 - 11. [Hugjiletu,YANG Jie. Baoyintaogetao,et al. Effects of different interferences on species diversity and biomass of typical grassland communities[J]. Acta Prataculturae Sinica,2009,18(3):6 - 11]

[23] 范永刚,胡玉昆,李凯辉,等. 不同干扰对高寒草原群落物种多样性和生物量的影响[J]. 干旱区研究,2008,25(4):531 - 536. [FAN Yonggang,HU Yukun,LI Kaihui,et al. Effects of different interferences on species diversity and biomass of alpine steppe community[J]. Arid Zone Research,2008,25(4):531 - 536.]

[24] 刘小丹,李瑞,张克斌,等. 半干旱区人工封育草场植物群落物种多样性与复杂性研究——以宁夏盐池为例[J]. 生态环境学报,2014,(7):1093 - 1101. [LIU Xiaodan,LI Rui,ZHANG Kebin,et al. Diversity of plant species and communities complexity in artificial fencing region of semi-arid area:A case study of Yanchi County of Ningxia[J]. Ecology and Environmental Science,2014,(7):1093 - 1101.]

[25] 韩大勇. 松嫩草地破碎化生境植物组成多样性格局及维持机制[D]. 长春:东北师范大学,2009. [HAN Dayong. The diversity pattern and maintenance mechanism of the broken plant habitat in Songnen grassland[D]. Changchun: Northeast Normal University,2009.]

[26] 丁艳玲. 植被覆盖度遥感估算及其真实性检验研究[D]. 北京:中国科学院大学,2015. [DING Yanling. Estimation of vegetation coverage and its authenticity test[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences,2015]

[27] 张灵菲. 高寒草甸恢复演替过程中植物多样性与生产力关系的研究[D]. 兰州: 兰州大学,2013. [ZHANG Lingfei. Study on the relationship between plant diversity and productivity during the restoration and succession of alpine meadow [D]. Lanzhou: Lanzhou University,2013.]

[28] 贾舒征. 松嫩平原退化放牧地恢复演替过程中的物种多样性—生产力关系[D]. 长春: 东北师范大学,2011. [JIA Shuzheng. Relationship between species diversity and productivity in the restoration of degraded grazing land in Songnen Plain[D]. Changchun: Northeast Normal University,2011.]

[29] 吴初平,韩文娟,江波,等. 浙江定海次生林内物种丰富度与生物量和生产力关系的环境依赖性[J]. 生物多样性,2018,26(6):545 - 553. [WU Chuping,HAN Wenjuan,JIANG Bo,et al. Relationships between species richness and biomass productivity depend on environmental factors in secondary forests of Dinghai, Zhejiang Province[J]. Biodiversity Science,2018,26(6):545 - 553.]

[30] 彭少麟,黄忠良. 生产力与生物多样性之间的相互关系研究概述[J]. 生态科学,2000,19(1):1 - 9. [PENG Shaolin,HUANG Zhongliang. Review on the relationship between productivity and biodiversity[J]. Ecologic Science,2000,19(1):1 - 9.]

[31] 雷声坤,王玉宝,王怀彪,等. 榆林沙地矿区植被恢复技术示范生态效益分析[J]. 陕西林业科技,2018,(2):5 - 10. [LEI Shengkun,WANG Yubao,WANG Huaibiao,et al. Ecological benefits analysis of vegetation restoration technologies in mining zone of Yulin Sandy Area[J]. Shaanxi Forest Science and Technology,2018,(2):5 - 10.]

[32] 覃光莲,杜国祯,李自珍,等. 高寒草甸植物群落中物种多样性与生产力关系研究[J]. 植物生态学报,2002,26(5):57 - 62. [QIN Guanglian,DU Guozhen,LI Baizhen,et al. Relationship between producuivity and species diversity in alpine meadow plant community[J]. Acta Phytoecologica Sinica,2002,26(5):57 - 62.

[33] 栗文瀚,干珠扎布,曹旭娟,等. 海拔梯度对藏北高寒草地生产力和物种多样性的影响[J]. 草业学报,2017,26(9):200 - 207. [LI Wenhan,Ganzhuzabu,CAO Xujuan,et al. Effects of altitude on plant productivity and species diversity in alpine meadow of northern Tibet[J]. Acta Prataculturae Sincia,2017,26(9):200 - 207.]

[34] 贾翔,黄铁成,梁艳,等. 新疆阿尔泰山圆叶桦空间分布对温度变化的响应[J]. 冰川冻土,2016,38(5):1411 - 1416. [JIA Xiang,HUANG Tiecheng,LIANG Yan,et al. Response of spatial distribution of *Betula rotundifolia* to temperature change in the Altai Mountains,Xinjiang[J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2016,38(5):1411 - 1417]

Effects of different restoration measures on species diversity and aboveground biomass of the gold mining area in headwaters of the Ertix River

XU Jia[1], ZHU Xiao-tong[2,3], YUAN Kai-ye[2,3]

(1 *Xinjiang Ertix River Basin Development & Construction Administrative Bureau*, *Urumqi* 830002, *Xinjiang*, *China*;

2 *University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049, *China*;

3 *Xinjiang Institute of Ecology and Geography*, *Chinese Academy of Sciences*, *Urumqi* 830011, *Xinjiang*, *China*)

Abstract: In recent years, due to the exploitation of the gold mine along the Ertix River, Xinjiang, China and the intensive grazing, the local ecological environment has deteriorated drastically. The ecological restoration of the mining areas is a hot issue for scholars at home and abroad. By using reasonable ecological restoration measures in damaged mining areas can not only reduce their self-recovery period, but also form different community types that adapt to the special habitat of the mining areas, enhancing the species diversity and ecological stability. In this context, this paper takes the abandoned gold mining areas along the Ertix River as the research object to investigate 5 different restoration measures using sampling experiments started in October 2011. The five kinds of measures included the artificial soil covering (the soil was taken around the experimental area, and then the soil was evenly applied to cover the surface after the surface levelling, and the thickness was generally 2 to 3 cm), the blackcurrant planting (Planting black currant on the land after the surface levelling), water replenishment treatment (the spring flood was introduced to the experimental area, mainly in the form of flood overflow and river water supply near the experimental site of the river.), sheep encamping (in order to improve the soil nutrient conditions and optimize the vegetation growth environment), mud distribution by spraying (water and soil were mixed at a volume ratio of 9 : 1, and then pumped out with a water pump and sprayed evenly in the experimental area.) and the sheep dung coverage (the soil was directly covered by the sheep manure at a thickness of 0.5 cm, 1 cm, 1.5 cm, and 2.0 cm in the test sites respectively after the surface levelling, and the recovery effect was observed one year later). By setting eight experimental areas with a size of 400 m × 200 m (56 sample plots all together), the type, frequency, height and other indicators of the species in each experimental site were recorded, and the aboveground biomass of the vegetation was determined by the harvest method. The effects of the difference restoration measures (planting blackcurrants, artificial hydration, flocking, etc.) on species diversity and biomass of the plant were analyzed by using the statistical s/w packages SPSS and Excel. The results show as follows: (1) by adopting different restoration measures, the ecological environment of the damaged mining area has been significantly improved, and the number of species in each plant community has been increased by 5% to 30%. (2) From the perspective of the vegetation community structure, vegetation coverage, aboveground biomass and species diversity, the effect of the measures of A5 (corralling flock), A4 (water supplement), A3 (covering soil and planting blackcurrants) were much better. (3) There was a significant positive correlation between species diversity and aboveground biomass ($P < 0.05$) by regression analysis. This study could provide reference for vegetation restoration and reconstruction in similar mining areas.

Key words: the Ertix River; artificial restoration measures; mining area; species diversity; biomass